

Aplikasi Sistem Pneumatik Pada Model *Excavator*

Irdam
Perawatan Mekanik
Akademi Teknik Soroako
Soroako, Indonesia
Irdamsumasang77@yahoo.co.id

Rafiuddin Syam
Jurusan Mesin Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
Makassar, Indonesia
rafiuddinsyam@gmail.com

Abstrak—Penelitian ini bertujuan merancang dan membuat model ekskavator dengan sistem pneumatik, membuat formulasi kinematika, dan menguji model ekskavator dengan sistem pneumatik. Metode penelitian mengikuti tahapan-tahapan berikut. Tahapan perancangan dan pembuatan model ekskavator dimulai dengan perencanaan yang meliputi pemilihan bahan, aktuator, menentukan dimensi, cara kerja, mekanisme, metode pengontrolan, membuat gambar kerja dan gambar rancangan dalam dua dimensi dan tiga dimensi. Kemudian, tahap pembuatan meliputi pembuatan mekanik, elektronik, dan program pada mikrokontroler. Membuat formulasi kinematika lengan-lengan model ekskavator dengan sistem pneumatik berdasarkan perhitungan manipulator dengan empat derajat kebebasan dan membuat analisis kinematika pada *mobile robot*. Pengujian dilakukan pada lengan-lengan model ekskavator dengan sistem pneumatik meliputi gaya yang terjadi pada silinder pneumatik, gaya angkat dan tekan pada *bucket*, kemampuan mengeruk material di lapangan dan untuk *mobile robot* dilakukan pengujian *error tracking* lintasan. Hasil proses perancangan dan pembuatan diperoleh dimensi utama untuk *mobile robot*, yaitu jarak sumbu roda 167 mm, lebar *track* 188 mm, diameter roda 64 mm. Jarak kerja (*working range*) *boom* 307 mm, *arm* 105 mm, *bucket* 98 mm, total 500 mm. Berat total 3.560 gram. Dari kinematika lengan diperoleh posisi x , y , dan z pada *end effector* $x_T=0.335\text{m}$, $y_T=0.193\text{m}$ dan $z_T=0.310\text{m}$. Kecepatan *mobile robot* diperoleh $x_F=1.811\pi\text{rad/s}$, $y_F=2.147\pi\text{rad/s}$, $\theta=2.8\pi\text{rad/s}$. Percepatan *mobile robot* diperoleh $x_F=0.343\text{rad/s}^2$, $y_F=-0.029\text{rad/s}^2$, $\theta=0.243\text{rad/s}^2$. Gaya dorong aktual silinder pneumatik pada tekanan 100 PSI, yaitu $F_{\text{maju}}=3020\text{gr}$, $F_{\text{mundur}}=2150\text{gr}$. Gaya angkat dan tekan aktual *bucket* $F_{\text{angkat}}=570\text{gr}$, $F_{\text{tekan}}=1060\text{gr}$. Berat rata-rata mengeruk material tanah 192.5gr. *Error tracking* lintasan untuk *mobile robot* adalah lintasan 1 navigasi otomatis $e_{\text{total}}=10.968\text{mm}$, manual $e_{\text{total}}=12.905\text{mm}$, lintasan 2 navigasi otomatis $e_{\text{total}}=13.900\text{mm}$, manual $e_{\text{total}}=11.522\text{mm}$.

Kata kunci: *pneumatik, ekskavator, silinder pneumatik, tekanan, gaya*

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Excavator (ekskavator) adalah alat berat yang terdiri dari *boom* (bahu) lengan (*arm*), serta *bucket* (alat keruk) dan digerakkan oleh tenaga hidrolik yang dimotori dengan mesin diesel dan berada di atas roda rantai (*trackshoe*). *Excavator* merupakan alat berat paling serbaguna karena bisa menangani berbagai macam pekerjaan alat berat lain. Sesuai dengan namanya (*excavation*), alat berat ini memiliki fungsi utama untuk pekerjaan penggalian. Namun tidak terbatas itu saja, *excavator* juga bisa melakukan pekerjaan konstruksi seperti

membuat kemiringan (*sloping*), memuat *dumpruck* (*loading*), pemecah batu (*breaker*), dan sebagainya. [1].



Gambar 1. *Excavator Komatsu PC200 Unit Standar* [1].

Kemajuan teknologi dewasa ini membuat industri-industri modern berupaya untuk meningkatkan kualitas, kuantitas dan efektivitas produk-produk yang mereka hasilkan. Oleh karena itu industri-industri modern tersebut memerlukan pengotomatisasian secara kontinyu dan sistem yang banyak digunakan pada saat sekarang ini adalah pneumatik. Hal ini dikarenakan pneumatik mempunyai beberapa keuntungan yang tidak dipunyai oleh sistem lain. Walaupun dewasa ini dunia industri didalam pencapaian efisiensi yang tinggi, menggabungkan sistem pneumatik dengan sistem elektrik, elektronik, hidrolik, dan mekanik [4].

Dalam perkembangannya sistem pneumatik digabungkan dengan sistem elektrik untuk mempermudah pengoperasian yang disebut Sistem Elektropneumatik. Keuntungan penggunaan komponen elektrik sebagai kontrol dari sistem pneumatik adalah sinyal elektrik dapat ditransmisikan melalui kabel secara mudah dan cepat dengan jarak yang jauh [4].

Pada penelitian ini konfigurasi model *excavator* dengan sistem pneumatik dibuat berdasarkan robot artikulasi/konfigurasi sendi lengan dengan empat derajat kebebasan. Robot ini terdiri dari tiga lengan yang dihubungkan dengan dua *Revolute Joint*. *Elbow Joint* menghubungkan *Force Arm* dengan *Upper Arm*. *Shoulder Joint* menghubungkan *Upper Arm* dengan *Base* [5].

Model *excavator* dengan sistem pneumatik menggunakan kontrol loop terbuka atau umpan maju (*feedforward control*) dapat dinyatakan sebagai sistem kontrol yang *outputnya* tidak diperhitungkan ulang oleh controller. Keadaan apakah robot telah benar-benar mencapai target seperti yang dikehendaki sesuai referensi, adalah tidak mempengaruhi kerja controller [6]. Persamaan Kinematika yang digunakan untuk mengetahui posisi setiap sendi ketika model *excavator* melakukan gerakan adalah metoda Denavit-Hartenberg yang dikenal dengan DH Parameter [7][8][9][10]. Gaya gesek pada silinder pneumatik

ditentukan oleh pelumasan, tekanan balik, bentuk dari seal dan sebagainya. Gaya torak efektif sangat berarti dalam perencanaan silinder. Dalam perhitungan gaya torak efektif, hambatan gesek harus diperhitungkan [11]. Analisa gaya angkat pada silinder pengangkat telah dibuat pada *excavator* 320 menggunakan tiga jenis *boom* dengan berbagai posisi diperoleh gaya berat maksimum yang terjadi adalah pada jenis *Reach boom* dengan jenis *stick* R1.9C dengan $Fr = 35154,56$ kg, untuk jenis *Mass boom* dengan jenis *stick* M 2.4 C dengan $Fr = 34195,83$ kg dan jenis *VA boom* dengan jenis *stick* M1.9 C dengan $Fr = 36698,00$ kg [12].

B. Rumusan Masalah

- Bagaimana merancang dan membuat model excavator dengan sistem pneumatik?
- Bagaimana membuat formulasi kinematika model excavator dengan sistem pneumatik?
- Bagaimana menguji model excavator dengan sistem pneumatik?

C. Tujuan Rancang Bangun

- Merancang dan membuat model excavator dengan sistem pneumatik.
- Membuat formulasi kinematika model excavator dengan sistem pneumatik.
- Menguji model excavator dengan sistem pneumatik.

D. Batasan Masalah

Pada penelitian ini, penulis membatasi beberapa hal, yaitu :

- Komponen model excavator dengan sistem pneumatik dibuat dari pelat aluminium dan dapat mewakili pergerakan lengan excavator.
- Beberapa komponen model excavator dengan sistem pneumatik diperoleh dengan membeli.
- Membuat formulasi kinematika model excavator dengan sistem pneumatik.

E. Manfaat Rancang Bangun

- Mampu mendesain, membuat, mensimulasi dan menguji model excavator dengan sistem pneumatik
- Memberikan masukan, tambahan pengetahuan untuk penelitian dan pengembangan lebih lanjut di bidang otomasi dan robotika.

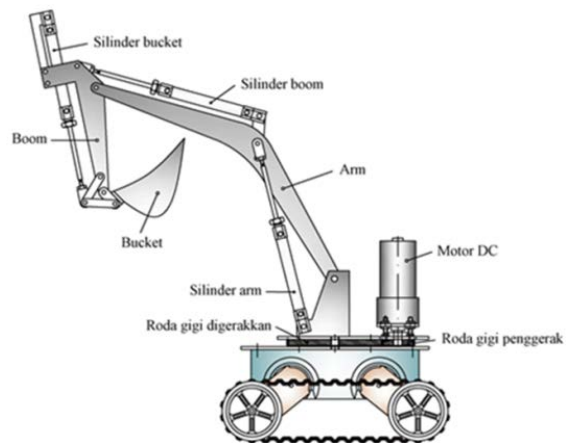
II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Perancangan dan penelitian ini akan dilaksanakan pada bulan Januari sampai juni 2014 di Workshop Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

1) Mendesain model excavator dengan sistem pneumatik

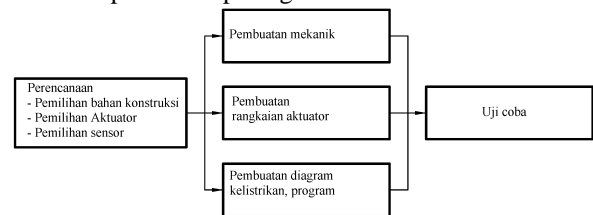
Dari gambar 2 terlihat gambar model *excavator* yang akan dibuat. Dari keseluruhan gambar terdapat beberapa komponen yang diperoleh dengan membeli yaitu bagian roda, roda gigi, motor DC dan silinder pneumatik. Komponen yang lain dibuat dari material pelat aluminium tebal 3,2 mm dan tebal 1,6 mm dengan dimensi disesuaikan dengan komponen-komponen yang dibeli.



Gambar 2. Model *excavator* dengan sistem pneumatik

2) Tahapan pembuatan model excavator pneumatik

Secara garis besar, tahapan pembuatan model *excavator* pneumatik dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Tahapan pembuatan model *excavator* dengan sistem pneumatik

Tahapan pembuatan model *excavator* pneumatik, yaitu:

- Perencanaan, meliputi pemilihan hardware dan desain
- Pembuatan, meliputi mekanik, elektronik, program
- Uji coba

3) Tahap perencanaan

Dalam tahap ini, hal yang perlu ditentukan dalam pembuatan model *excavator* pneumatik:

- Dimensi, yaitu panjang, lebar dan tinggi
- Struktur material, apakah dari aluminium, besi, kayu, plastik, dan sebagainya.
- Cara kerja, berisi komponen-komponen model excavator dengan sistem pneumatik dan fungsi dari komponen-komponen itu. Misalnya arm (lengan), boom (bahu) serta bucket (alat keruk)
- Mekanisme, bagaimana sistem mekanik agar model excavator pneumatik dapat bekerja.
- Metode pengontrolan, yaitu bagaimana model excavator pneumatik dapat dikontrol dan digerakkan, sistem kontrol yang digunakan.

4) Tahap pembuatan

Dalam tahap ini pekerjaan yang harus dilakukan yaitu pembuatan mekanik, elektronik, program.

a) Pembuatan sistem mekanik

Setelah gambaran garis besar bentuk model *excavator* pneumatik dirancang, maka komponen-komponen dari model *excavator* pneumatik dapat mulai dibuat. Model *excavator* pneumatik terbuat dari pelat aluminium. Penyambungan rangka satu sama lain dengan baut dan mur.

b) Pembuatan sistem elektronik

Dari desain dan cara kerja model *excavator* dengan pneumatik, maka pembuatan maupun pembelian komponen-komponen elektronik mulai dibuat. Pembuatan sistem elektronik disesuaikan dengan desain yang telah dibuat mulai dari pembelian *microcontroller*, komponen elektronik dan pembuatan driver motor.

c) Perakitan

Setelah pembuatan mekanik dan elektronik selesai maka selanjutnya perakitan dimulai dari perakitan komponen mekanik, elektronik dan peralatan pneumatik. Setelah semua terpasang pada tempatnya lalu dilakukan perakitan rangkaian mekanik, elektronik dan pneumatik.

d) Pembuatan program

Pembuatan program berdasarkan mekanisme dari seluruh gerakan Model *excavator* dengan sistem pneumatik yang diinginkan, mulai dari gerakan *mobile* sampai gerakan lengan-lengan.

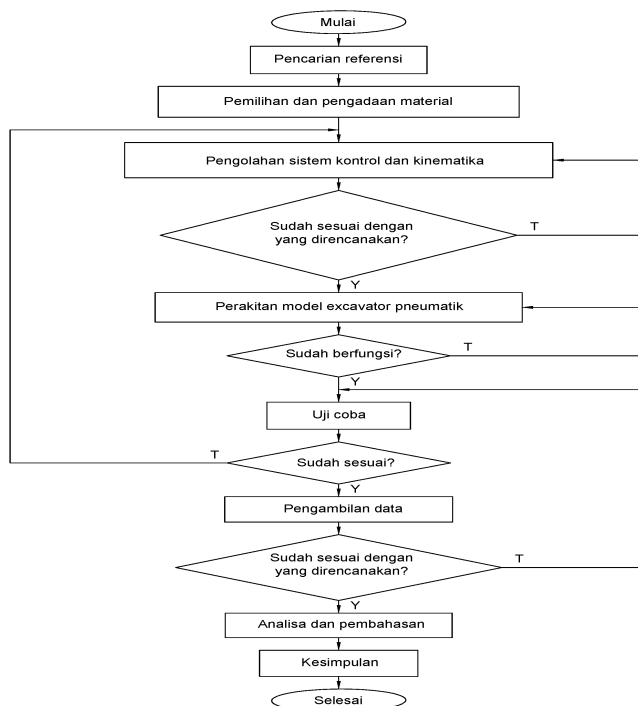
5) Uji coba

Setelah semua tahap perencanaan dan pembuatan selesai maka tahap selanjutnya yaitu uji coba untuk mengevaluasi apakah model *excavator* pneumatik dapat bekerja sesuai yang diinginkan, baik dari sisi mekanik dan elektriknya.

6) Prosedur Penelitian

- Menggambar desain mekanis komponen-komponen model *excavator* dengan sistem pneumatik dalam gambar dua dimensi dan tiga dimensi.
- Menyiapkan peralatan dan bahan yang akan digunakan dalam pelaksanaan rancang bangun.
- Menghitung persamaan kinematika dalam proses pergerakan model *excavator* dengan sistem pneumatik.
- Melakukan simulasi dan pengujian.

7) Diagram Alir Penelitian



Gambar 4. Diagram alir penelitian

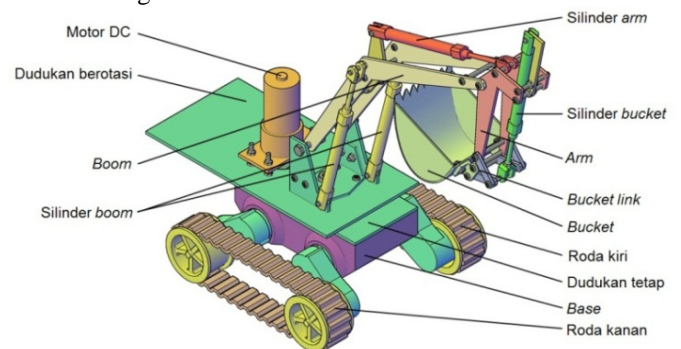
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Desain dan pembuatan model *excavator* dengan sistem pneumatik

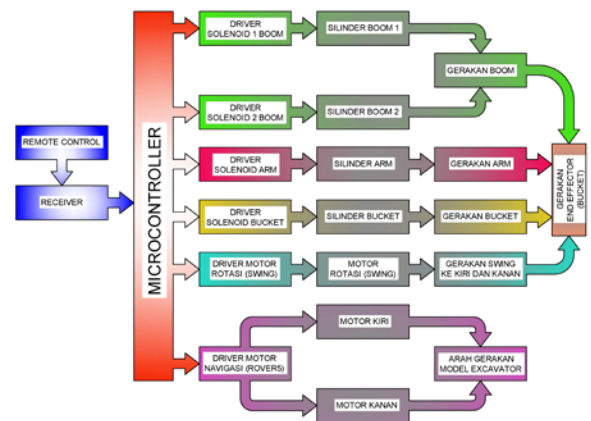
Ada beberapa tahapan yang dilakukan dalam mendesain dan membuat model *excavator* dengan sistem pneumatik yaitu mendesain model *excavator* dengan sistem pneumatik, membuat model *excavator* dengan sistem pneumatik yang meliputi pembuatan sistem mekanik, sistem elektronik, pembuatan program pada *microcontroller* dan melakukan simulasi pada model *excavator* dengan sistem pneumatik.

1) Mendesain model *excavator* dengan sistem pneumatik

Pada gambar 5 terlihat desain mekanik model *excavator* dengan sistem pneumatik dalam gambar tiga dimensi. Secara umum model *excavator* ini terbagi atas dua bagian yaitu bagian base dan lengan.



Gambar 5. Desain mekanik model *excavator* dengan sistem pneumatik dalam gambar tiga dimensi



Gambar 6. Skema pengendalian/kontrol model *excavator* dengan sistem pneumatik

Dari gambar 6 terlihat Skema pengendalian/kontrol model *excavator* sistem pneumatik. Model *excavator* ini dikontrol dengan sistem kontrol loop terbuka, dimana sinyal perintah atau input diberikan lewat sebuah *remote* kontrol yang selanjutnya diolah pada mikrokontroller, kemudian dilanjutkan pada *driver* motor dan *solenoid valve* kemudian aktuator-aktuator akan bergerak sesuai dengan perintah yang diberikan pada *remote* kontrol yang menghasilkan gerakan pada lengan model *excavator* dan arah pada *mobile* robot yaitu maju, mundur, berbelok ke kiri dan kanan.

2) Membuat model *excavator* dengan sistem pneumatik

Dalam pembuatan model *excavator* sistem pneumatik terbagi atas empat tahap pembuatan yaitu pembuatan sistem mekanik, elektronik, perakitan dan program pada *microcontroller*.










a) Membuat sistem mekanik model excavator

Pembuatan mekanik terdiri dari beberapa komponen yang diperoleh dengan cara membeli, komponen yang lain dibuat sendiri disesuaikan dengan komponen-komponen yang dibeli.

b) Komponen mekanik yang dibuat

Seperti terlihat pada tabel 1 daftar komponen mekanik yang dibuat pada proses pembuatan model *excavator* dengan sistem pneumatik.

TABLE I. DAFTAR KOMPONEN MEKANIK YANG DIBUAT

No.	Nama alat	Photo alat	Keterangan	Spesifikasi
1	Dudukan tetap		Sebagai dudukan base yang tidak berputar	PxLxT 189x88x3.2 mm
2	Dudukan bergerak		Sebagai dudukan base yang berputar dan tempat seluruh komponen	PxLxT 255x130x3.2 mm
3	Base		Sebagai base dan dudukan silinder arm	Tebal 3.2 mm
4	Boom		Sebagai boom	Tebal 3.2 mm
5	Arm		Sebagai arm	Tebal 3.2 mm
6	Bucket		Sebagai bucket	Tebal 1.6 mm
7	Braket silinder		Sebagai braket silinder arm dan bucket	Tebal 3.2 mm
8	Braket silinder rod		Sebagai braket silinder rod	Tebal 3.2 mm
9	Bucket link		Sebagai link untuk menggerakkan bucket	Tebal 3.2 mm


c) Membuat sistem elektronik


Pembuatan sistem elektronik terdiri dari beberapa komponen yang diperoleh dengan cara membeli, modifikasi dan dibuat sendiri.

d) Komponen-komponen elektronik yang dibuat

Seperti terlihat pada tabel 2 daftar komponen elektronik yang dibuat pada proses pembuatan model *excavator* dengan sistem pneumatik.

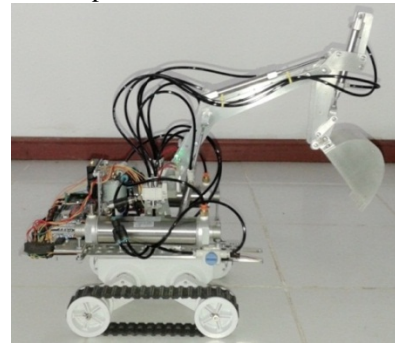
TABLE II. DAFTAR KOMPONEN ELEKTRONIK YANG DIBUAT

No.	Nama alat	Photo alat	Keterangan	Spesifikasi
1	Driver untuk motor		Untuk menggerakkan motor pada Rover 5	2A

2	Driver untuk motor		Untuk menggerakkan motor pada gerak rotasi (swing)	2A
3	Remote control		Untuk mengontrol semua gerakan	Joystick PS2 Wireless 2.4G
4	Remote control receiver		Sebagai penerima sinyal dari joystick PS2 (modifikasi)	Receiver Joystick PS2 Wireless 2.4G

3) Tahap perakitan

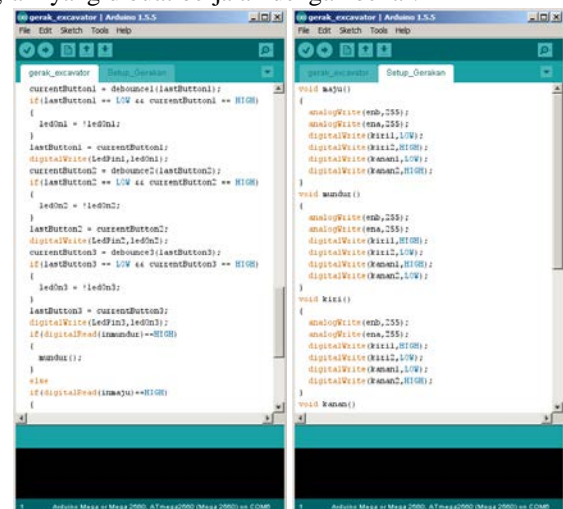
Seperti yang terlihat pada gambar 7 pada tahap ini semua komponen mekanik dan elektronik dipasang pada dudukan yang telah dibuat sebelumnya, dimulai dari pemasangan mekanik, elektronik dan peralatan pneumatik. Setelah semua terpasang pada tempatnya lalu dilakukan pemasangan rangkaian listrik dan pneumatik.



Gambar 7. Model *excavator* dengan sistem pneumatik dengan seluruh komponen terpasang

4) Membuat program pada microcontroller

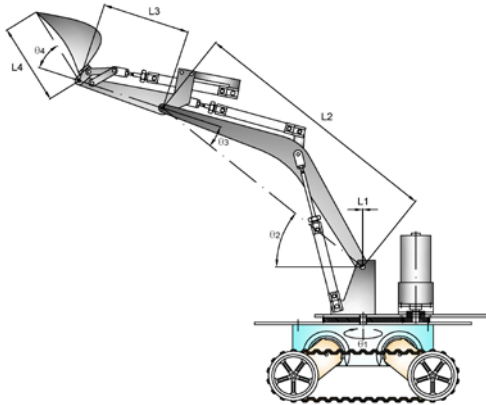
Pembuatan program ini untuk menentukan bagaimana model *excavator* melakukan gerakan sesuai dengan yang kita inginkan. *Software* yang digunakan adalah Arduino 1.5.5 seperti yang terlihat pada gambar 8, program yang telah dibuat di upload ke *microcontroller* melalui kabel *USB*, kemudian dilakukan uji coba jika sudah sesuai maka dilanjutkan dengan simulasi di lapangan jika tidak program dicek ulang sampai program yang dibuat berjalan dengan benar.



Gambar 8. Jendela *software* Arduino 1.5.5

B. Membuat formulasi Kinematika model excavator dengan sistem pneumatik

Aplikasi perhitungan DH parameter dapat kita lihat pada lengan model excavator dengan sistem pneumatik.



Gambar 9. Konfigurasi model excavator dengan sistem pneumatik

1) Contoh perhitungan kinematika lengan model excavator pneumatik

TABLE III. CONTOH DH PARAMETER

$i-1$	i	$\alpha_{(i-1)}$	$a_{(i-1)}$	d_i	θ_i
0	1	0°	0	0	30°
1	2	90°	0.307	0	39°
2	3	0°	0.105	0	-20°
3	4	0°	0.097	0	40°

- Transformasi matriks untuk sumbu 1

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.866 & -0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.866 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Transformasi matriks untuk sumbu 2

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.777 & -0.629 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0.629 & 0.777 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Transformasi matriks untuk sumbu 3

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & L_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.939 & 0.342 & 0 & 0.307 \\ -0.342 & 0.939 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Transformasi matriks untuk sumbu 4

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & L_3 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.766 & -0.643 & 0 & 0.105 \\ 0.643 & 0.766 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pergerakan lengan-lengan dari dasar (base) sampai sumbu 4 dapat dilihat pada persamaan berikut:

$${}^0_4T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \cdot {}^3_4T$$

a) Pergerakan lengan dari dasar (base) menuju sumbu 2:

$${}^0_2T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T = \begin{bmatrix} 0.866 & -0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.866 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.777 & -0.629 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0.629 & 0.777 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0_2T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T = \begin{bmatrix} 0.672 & -0.544 & 0.5 & 0 \\ 0.388 & -0.314 & -0.866 & 0 \\ 0.629 & 0.777 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Jadi posisi x, y dan z dalam sumbu 2 adalah:

$$x_2 = 0 \text{ m}$$

$$y_2 = 0 \text{ m}$$

$$z_2 = 0 \text{ m}$$

b) Pergerakan lengan dari dasar (base) menuju sumbu 3:

$${}^0_3T = {}^0_2T \cdot {}^2_3T = \begin{bmatrix} 0.672 & -0.544 & 0.5 & 0 \\ 0.388 & -0.314 & -0.866 & 0 \\ 0.629 & 0.777 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.939 & 0.342 & 0 & 0.307 \\ -0.342 & 0.939 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0_3T = {}^0_2T \cdot {}^2_3T = \begin{bmatrix} 0.818 & -0.281 & 0.5 & 0.206 \\ 0.472 & -0.162 & -0.866 & 0.119 \\ 0.324 & 0.944 & 0 & 0.193 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Jadi posisi x, y dan z dalam sumbu 3 adalah:

$$x_3 = 0.206 \text{ m}$$

$$y_3 = 0.119 \text{ m}$$

$$z_3 = 0.193 \text{ m}$$

c) Pergerakan lengan dari dasar (base) menuju sumbu 4:

$${}^0_4T = {}^0_3T \cdot {}^3_4T = \begin{bmatrix} 0.818 & -0.281 & 0.5 & 0.206 \\ 0.472 & -0.162 & -0.866 & 0.119 \\ 0.324 & 0.944 & 0 & 0.193 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.766 & -0.643 & 0 & 0.105 \\ 0.643 & 0.766 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0_4T = {}^0_3T \cdot {}^3_4T = \begin{bmatrix} 0.445 & -0.741 & 0.5 & 0.292 \\ 0.257 & -0.428 & -0.866 & 0.168 \\ 0.856 & 0.514 & 0 & 0.227 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Jadi posisi x, y dan z dalam sumbu 4 adalah:

$$x_4 = 0.292 \text{ m}$$

$$y_4 = 0.168 \text{ m}$$

$$z_4 = 0.227 \text{ m}$$

d) Pergerakan lengan dari dasar (base) menuju end effector:

$$\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.445 & -0.741 & 0.5 & 0.292 \\ 0.257 & -0.428 & -0.866 & 0.168 \\ 0.856 & 0.514 & 0 & 0.227 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.097 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$x_T = 0.097 \cdot 0.445 + 0.292 = 0.335 \text{ m}$$

$$y_T = 0.097 \cdot 0.257 + 0.168 = 0.193 \text{ m}$$

$$z_T = 0.097 \cdot 0.856 + 0.227 = 0.310 \text{ m}$$

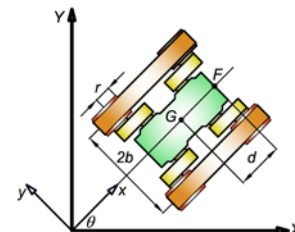
Jadi posisi x, y dan z pada end effector adalah:

$$x_T = 0.335 \text{ m}$$

$$y_T = 0.193 \text{ m}$$

$$z_T = 0.310 \text{ m}$$

C. Analisis Kinematika Mobile Robot



Gambar 10.. DDMR pada medan 2D Cartesian

1) Contoh Perhitungan Kinematika Untuk Kecepatan Diketahui:

$$2b = 188 \text{ mm} = 0.188 \text{ m}$$

$$r = 31 \text{ mm} = 0.031 \text{ m}$$

$$d = 85 \text{ mm} = 0.085 \text{ m}$$

$$\theta = 45^\circ$$

$$\dot{\theta}L = \dot{\theta}R = 84 \text{ rpm} = 2.8 \pi \text{ rad/s}$$

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}^2 \cdot r = 2.8^2 \cdot 0.031 = 0.243 \pi^2 \text{ rad/s}^2$$

Bentuk umum persamaan kinematika *wheeltrack robot* seperti terlihat pada persamaan:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & -0.085 \sin 45^\circ \\ \sin 45^\circ & 0.085 \cos 45^\circ \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2.8\pi \\ 2.8\pi \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.707 & -0.060 \\ 0.707 & 0.060 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2.8\pi \\ 2.8\pi \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.811\pi \\ 2.147\pi \\ 2.8\pi \end{bmatrix}$$

2) Contoh Perhitungan Kinematika Untuk Percepatan Diketahui:

$$2b = 188 \text{ mm} = 0.188 \text{ m}$$

$$r = 31 \text{ mm} = 0.031 \text{ m}$$

$$d = 85 \text{ mm} = 0.085 \text{ m}$$

$$\theta = 45^\circ$$

$$\dot{\theta}L = \dot{\theta}R = 84 \text{ rpm} = 2.8 \pi \text{ rad/s}$$

$$\dot{\theta}L = \dot{\theta}R = 84 \text{ rpm} = 2.8 \pi \text{ rad/s}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin 45^\circ & -\cos 45^\circ & -0.085 \cos 45^\circ + 0.085 \sin 45^\circ \\ \cos 45^\circ & -\sin 45^\circ & -0.085 \sin 45^\circ - 0.085 \cos 45^\circ \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_L \\ \dot{\theta}_R \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.707 & -0.707 & -0.085 \cdot 0.707 + 0.085 \cdot 0.707 \\ 0.707 & -0.707 & -0.085 \cdot 0.707 - 0.085 \cdot 0.707 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.243 \\ 0.243 \\ 2.8\pi \end{bmatrix}$$

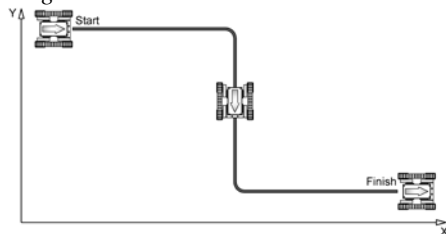
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.414 & 0 \\ 0 & -0.120 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.243 \\ 0.243 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.343 \\ -0.029 \\ 2.8\pi \end{bmatrix}$$

D. Perhitungan error mobile robot untuk tracking lintasan

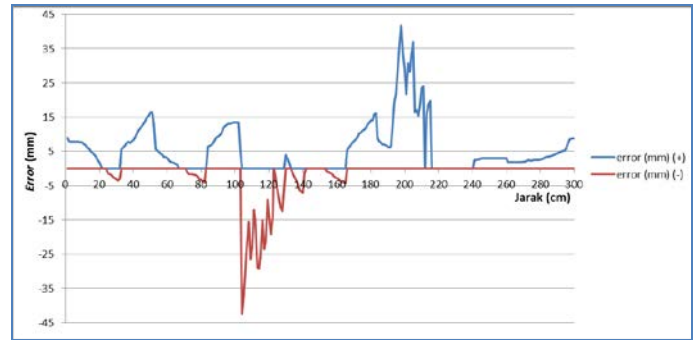
Pada lintasan yang dibuat seperti terlihat pada gambar 11 dilakukan percobaan *error* dengan navigasi otomatis menggunakan sensor *line tracking*, kemudian dengan navigasi manual menggunakan *remote control* dengan spesifikasi dapat dilihat pada tabel 2. Mobile robot dijalankan mengikuti lintasan.

1) Perhitungan error track lintasan



Gambar 11. Track lintasan 1

Pada lintasan 1 seperti terlihat pada gambar 11, *mobile robot* mulai jalan pada lintasan *start*. *Mobile robot* bergerak lurus mendatar sumbu X sejauh 100 cm kemudian berbelok pada belokan pertama ke arah kanan sebesar 90° lalu bergerak lurus mendatar sumbu Y sejauh 100 cm kemudian berbelok lagi pada belokan kedua ke arah kiri sebesar 90° lalu bergerak lurus pada lintasan yang mendatar sumbu X sejauh 100 cm sampai mencapai *finish*.



Gambar 12. Error vs jarak pada lintasan (navigasi otomatis)

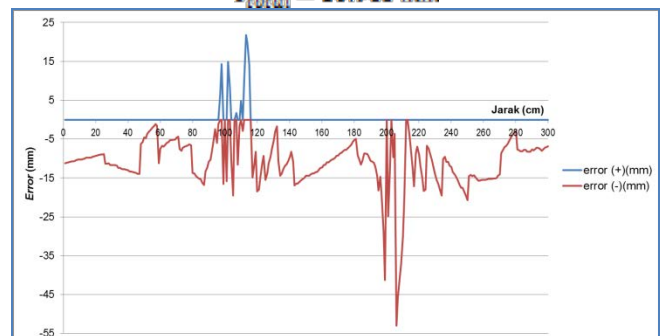
Pada gambar 12 terlihat bahwa *error* terbesar terjadi pada belokan pertama dan kedua. Hal tersebut disebabkan karena pada saat *mobile robot* berbelok *mobile robot* melakukan transformasi (perubahan posisi) dari vertical ke horizontal membentuk sudut 90° yang menyebabkan sensor menjauh dari *track* lintasan sehingga mengakibatkan nilai *error* yang besar. Pada gambar 12 terlihat pula *error* untuk lintasan 1, data *error* diambil pada jarak setiap 1 cm. *Error* (+) adalah sensor menjauhi lintasan ke arah kanan sedangkan *error* (-) ke arah kiri dimana *error* terbesar berada pada belokan pertama pada jarak 104 cm sebesar -42.4 mm. Hasil perhitungan *error* total dapat dilihat sebagai berikut:

$$e_{total} = \sqrt{\frac{\sum_0^n e_x^2 + \sum_0^n e_y^2}{n}}$$

Dimana: e_{total} = Error total (mm)
 e_x = Error sumbu x (mm)
 e_y = Error sumbu y (mm)
 n = Jumlah pengukuran

$$e_{total} = \sqrt{\frac{24520.883 + 11568.660}{300}}$$

$$e_{total} = 10.968 \text{ mm}$$



Gambar 13. Error vs jarak pada lintasan (navigasi manual)

Pada gambar 13 terlihat bahwa *error* terbesar terjadi pada belokan pertama dan kedua. Hal tersebut disebabkan karena pada saat *mobile robot* berbelok *mobile robot* melakukan transformasi (perubahan posisi) dari vertical ke horizontal membentuk sudut 90° yang menyebabkan *mobile robot* menjauh dari *track* lintasan sehingga mengakibatkan nilai *error* yang besar. Pada gambar 13 terlihat pula *error* untuk lintasan 1, data *error* diambil pada jarak setiap 1 cm. *Error* (+) adalah sensor menjauhi lintasan ke arah kanan sedangkan *error* (-) ke arah kiri dimana *error* terbesar berada pada belokan kedua pada jarak 206 cm sebesar 53.02 mm. Hasil perhitungan *error* total dapat dilihat sebagai berikut:

$$e_{total} = \sqrt{\frac{\sum_0^n e_x^2 + \sum_0^n e_y^2}{n}}$$

$$e_{total} = \sqrt{\frac{1730.131 + 48232.338}{300}}$$

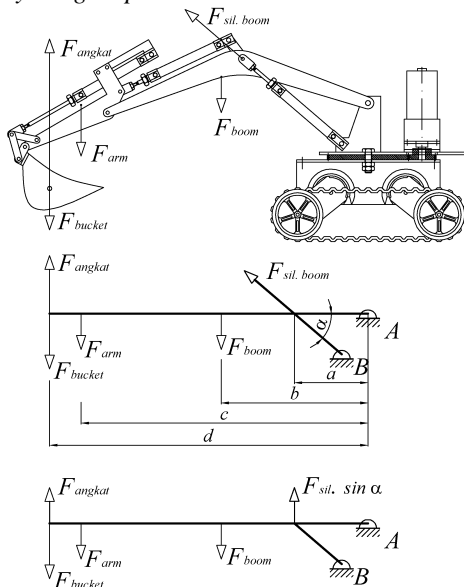
$$e_{total} = 12.905 \text{ mm}$$

E. Gaya-gaya yang terjadi pada lengan model excavator sistem pneumatik

1) Perhitungan gaya angkat dan tekan pada bucket

Gaya angkat dan tekan pada bucket dihitung pada posisi terjauh dari pusat rotasi. Gaya akibat berat dari boom, arm, bucket maupun silinder pneumatik dimasukkan dalam perhitungan ini:

a) Gaya angkat pada bucket



Gambar 14. Diagram benda bebas gaya angkat pada bucket.

Seperti terlihat pada gambar 14 untuk menghitung gaya angkat maksimal pada bucket, titik A dijadikan sebagai pusat momen, $F_{sil.boom}$ adalah gaya yang dihasilkan oleh dua silinder pneumatik yang mempunyai kemiringan sebesar α terhadap base. Gaya F_{boom} , F_{arm} dan F_{bucket} adalah gaya yang diperoleh dari berat boom, arm, bucket maupun silinder pneumatik, sedangkan F_{angkat} adalah gaya angkat maksimal pada bucket. Jarak a , b , c dan d adalah jarak masing-masing gaya ke pusat momen, sehingga gaya angkat dapat dihitung:

Dik. $F_{sil.boom} = 2F_{muda} = 7536.600 \text{ gram}$ $a = 87 \text{ mm}$
 $F_{boom} = 220 \text{ gram}$ $b = 173 \text{ mm}$
 $F_{arm} = 180 \text{ gram}$ $c = 338 \text{ mm}$
 $F_{bucket} = 110 \text{ gram}$ $d = 376 \text{ mm}$

Dit. $F_{angkat} = \dots? \text{ gram}$ $\alpha = 41^\circ$

$$\sum M_A = F_{sil.boom} \times \sin \alpha \times a - F_{boom} \times b - F_{arm} \times c - F_{bucket} \times d = F_{angkat} \times d$$

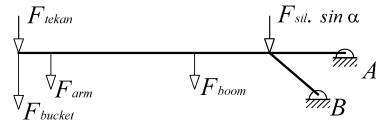
$$F_{angkat} = \frac{F_{sil.boom} \times \sin \alpha \times a - F_{boom} \times b - F_{arm} \times c - F_{bucket} \times d}{d}$$

$$F_{angkat} = \frac{7536.6 \times \sin 41^\circ \times 87 - 220 \times 173 - 180 \times 338 - 110 \times 376}{376}$$

$$F_{angkat} = 771.031 \text{ gram}$$

Dari perhitungan didapat bahwa gaya $F_{angkat} = 771.031$ gram sehingga arah F_{angkat} adalah ke atas maka gaya angkat maksimal pada bucket adalah ke atas sebesar 771.031 gram.

b) Gaya tekan pada bucket



Gambar 15.. Diagram benda bebas gaya tekan bucket

Seperti terlihat pada gambar 15 untuk menghitung gaya tekan maksimal pada bucket, titik A dijadikan sebagai pusat momen, F_{sil} adalah gaya yang dihasilkan oleh dua silinder pneumatik yang mempunyai kemiringan sebesar α terhadap base. Gaya F_{boom} , F_{arm} dan F_{bucket} adalah gaya yang diperoleh dari berat boom, arm, bucket maupun silinder pneumatik, sedangkan F_{tekan} adalah gaya tekan maksimal pada bucket. Jarak masing-masing gaya ke pusat momen terlihat pada gambar 14, sehingga gaya tekan dapat dihitung:

Dik. $F_{sil.boom} = 2F_{muda} = 6330.768 \text{ gram}$ $a = 87 \text{ mm}$
 $F_{boom} = 220 \text{ gram}$ $b = 173 \text{ mm}$
 $F_{arm} = 180 \text{ gram}$ $c = 338 \text{ mm}$
 $F_{bucket} = 110 \text{ gram}$ $d = 376 \text{ mm}$

Dit. $F_{tekan} = \dots? \text{ gram}$ $\alpha = 41^\circ$

$$\sum M_A = -F_{sil.boom} \times \sin \alpha \times a - F_{boom} \times b - F_{arm} \times c - F_{bucket} \times d = -F_{tekan} \times d$$

$$F_{tekan} = \frac{F_{sil.boom} \times \sin \alpha \times a + F_{boom} \times b + F_{arm} \times c + F_{bucket} \times d}{d}$$

$$F_{tekan} = \frac{6330.768 \times \sin 41^\circ \times 87 + 220 \times 173 + 180 \times 338 + 110 \times 376}{376}$$

$$F_{tekan} = 1334.048 \text{ gram}$$

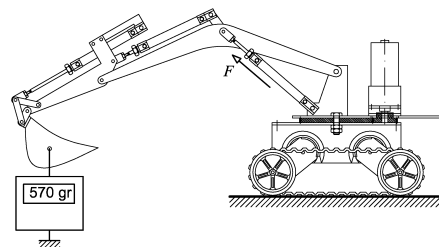
Dari perhitungan didapat bahwa gaya $F_{tekan} = 1334.048$ gram sehingga arah F_{tekan} adalah ke bawah maka gaya tekan maksimal pada bucket adalah ke bawah sebesar 1334.048 gram.

2) Hasil pengujian gaya-gaya aktual yang terjadi pada lengan model excavator sistem pneumatik

Pengujian dilakukan dengan mengukur langsung gaya-gaya yang terjadi dengan sebuah timbangan gantung digital. Timbangan gantung dipasang pada lengan model excavator sesuai dengan perhitungan yang telah dilakukan, berikut hasilnya:

a) Gaya angkat bucket

Seperti terlihat pada gambar 16 gaya angkat diukur dengan menggunakan timbangan gantung, kemudian F adalah gaya yang diperoleh dari dua silinder pneumatik digerakkan dengan tekanan 100 PSI lalu hasilnya dapat dilihat pada timbangan gantung digital. Gaya angkat berdasarkan pembacaan timbangan adalah 570 gram, lebih kecil 26.073% dari hasil perhitungan, hal ini disebabkan adanya beban tambahan dari boom, arm, bucket dan kerugian mekanik pada saat pengukuran.

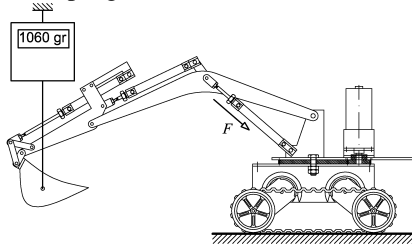


Gambar 16. Mengukur gaya angkat dengan timbangan gantung.

b) Gaya tekan bucket

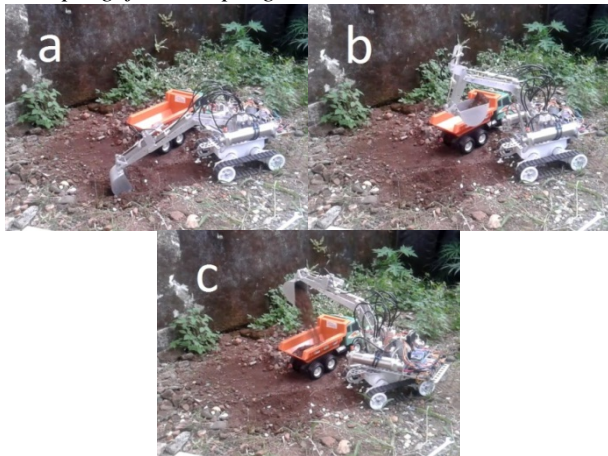
Seperti terlihat pada gambar 17 gaya tekan bucket diukur dengan menggunakan timbangan gantung, kemudian F adalah

gaya yang diperoleh dari dua silinder pneumatik digerakkan dengan tekanan 100 *PSI* lalu hasilnya dapat dilihat pada timbangan gantung digital. Gaya tekan *bucket* berdasarkan pembacaan timbangan adalah 1060 gram, lebih kecil 20.542% dari hasil perhitungan, hal ini disebabkan adanya kerugian mekanik pada saat pengukuran.



Gambar 17. Mengukur gaya tekan *bucket* dengan timbangan gantung.

4) Hasil pengujian di lapangan



Gambar 18. Model *excavator* mengisi truk mainan dengan material tanah

. Pengujian dilakukan di atas tanah dengan mengoperasikan model *excavator* secara manual dengan menggunakan *remote control* seperti terlihat pada gambar 18, material yang digunakan yaitu tanah yang telah digemburkan. Cara pengujian yaitu dengan mengeruk/mengambil material kemudian mengisi sebuah truk mainan, material yang mengisi truk ditimbang untuk mengetahui berat material yang berhasil diangkat.

Seperti terlihat pada gambar 18a model *excavator* mengeruk material kemudian pada gambar 18b material diangkat, pada gambar 18c material dibuang ke atas truk mainan, setelah dilakukan percobaan sebanyak empat kali berat total material yang diisi ke truk mainan yaitu 770 gram.

IV. PENUTUP

A. Kesimpulan

Dari hasil pembahasan dapat disimpulkan bahwa:

- Proses perancangan dan pembuatan model *excavator* dengan sistem pneumatik telah selesai dilakukan, diawali dengan membuat gambar desain pada program autocad, pembuatan mekanik dan elektronik, pembuatan program pada microcontroller. Material yang dipakai dalam pembuatan mekanik sebagian besar dari aluminium. Dimensi utama model *excavator* dengan sistem pneumatik yaitu untuk *mobile robot* (Rover 5) jarak sumbu roda 167 mm, lebar track 188 mm, diameter roda 64 mm. Untuk jarak kerja (*working*

range) yaitu boom 307 mm, arm 105 mm, bucket 98 mm, total jarak kerja 500 mm, berat total model *excavator* 3560 gram.

- Dari persamaan kinematika lengan model *excavator* diperoleh posisi *x, y* dan *z* pada end effector yaitu $x_T = 0.335$ m, $y_T = 0.193$ m, $z_T = 0.310$ m. Kecepatan *mobile robot* diperoleh $\dot{x}_F = 1.811\pi$ rad/s, $\dot{y}_F = 2.147\pi$ rad/s, $\dot{\theta} = 2.8\pi$ rad/s. Percepatan *mobile robot* diperoleh $\ddot{x}_F = -0.343$ rad/s², $\ddot{y}_F = -0.029$ rad/s², $\ddot{\theta} = -0.243$ rad/s².
- Dari hasil perhitungan gaya pada lengan model *excavator* diperoleh gaya dorong silinder pneumatik $F_{\text{maju efektif}} = 3768.3$ gram, $F_{\text{mundur efektif}} = 3165.384$ gram. Dari perhitungan gaya angkat dan tekan bucket diperoleh $F_{\text{angkat}} = 771.031$ gram, $F_{\text{tekan}} = 1334.048$ gram. Dari hasil pengujian dilapangan diperoleh pengujian error pada lintasan 1 otomatis etotal = 10.968 mm, manual etotal = 12.905 mm, lintasan 2 otomatis etotal = 13.900 mm, manual etotal = 11.522 mm. Pengukuran gaya dorong silinder pneumatik, gaya angkat dan tekan bucket dengan timbangan gantung diperoleh $F_{\text{maju}} = 3020$ gram, $F_{\text{mundur}} = 2150$ gram, $F_{\text{angkat}} = 570$ gram, $F_{\text{tekan}} = 1060$ gram. Rata-rata mengeruk material tanah 192 gram.

B. Saran

Terdapat kekurangan yang penulis temukan dalam perancangan dan pembuatan model *excavator* ini, maka di sarankan agar:

- Pada sistem pneumatik khususnya katup, gunakan katup jenis 5/3 center close sehingga positioning setiap silinder pneumatik dapat dilakukan.
- Gunakan Reservoir dengan dimensi yang lebih besar pada sistem pneumatik untuk menampung udara bertekanan lebih banyak sehingga pengujian dapat dilakukan lebih lama.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Lidiawati Indri. (2013). Pusat definisi. diakses 02 November 2013. Available from: <http://www.pusat-definisi.com/2012/11/excavator-adalah.html>
- [2] Modul ATS (1992), Otomasi
- [3] Yulianto Arief Budi., Eri K Mohammad. (2012). Rancang bangun HMI untuk modul pneumatik silinder single action (Tugas akhir). Surabaya: ITS
- [4] Yudoyono Danang. (2007). Rancang bangun alat pembuat cetakan kue dengan perangkat elektro pneumatik (Tugas akhir). Surabaya: ITS
- [5] Nabil Muhammad. (2012). Definisi dan jenis-jenis robot. diakses 27 Nopember 2013. Available from: <http://muhnabil.wordpress.com/2012/06/28/definisi-robot-dan-jenis-jenis-robot/>
- [6] Syam Rafiuddin. (2012). *Konsep dan cara membuat mobile robot*. Makassar: Penerbit Bumi publishing.
- [7] Craig. John J. (2006). *Introduction to robotics: mechanics and control/John J. Craig.-3rd ed.* USA: Pearson Education International.
- [8] Rosen Jacob, (2006), Models of robot manipulation EE 543

- [9] Nagrath Mittal, (2003), Robotics and Control. Tata McGraw-Hill
- [10] Saeed B. Niki, (2001), Introduction to robotics analysis, systems, application. Prentice Hall
- [11] Yanda Febi. (2014). Pneumatik. diakses 07 Juli 2014.
Available from:
<http://www.scribd.com/doc/227896743/BAB2-EI2-Pneumatik>
- [12] Zuchry M. Muhammad. (2011), Analisa gaya angkat dengan variasi sudut elevasi pada silinder pengangkat excavator CAT320, Jurnal SMARTek, Vol. 9 No. 4. Nopember 2011: 300 - 310
- [13] Widagda Iga. (2012). *Fuzzy logic*. diakses 06 Mei 2014.
Available from:
<http://igawidagda.files.wordpress.com/2012/02/diktat-fuzzy.pdf>
- [14] Nurmanto. (2011). Keuntungan dan kerugian penggunaan pneumatik. diakses 12 Oktober 2013.
Available from: <http://nurmanto.com/keuntungan-dan-kerugian-penggunaan-pneumatik/>